다층 패널의 피탄충격거동에 관한 수치해석적 연구

A Numerical Study on the Shock Behavior of Multi-layered Panels

박 찬 영* Chan-Young Park	양 홍 준* Hong-Jun Yang	이 경 훈* Kyoung-Hoon Lee	우 관 제* Kwan-Je Woo
	구 만 회** Man-Hoi Koo	주 재 현** Jae-Hyun Joo	

Abstract

In this paper, the characteristics of shock behavior of multi-layered panels under impact were studied. The panels consist of four different lightweight materials including al, al-foam, rubber and FRP in order to enhance their shock energy absorption. A commercial code, Ls-dyna was used to build the numerical model and study shock behavior based on the analysis of shock response spectrum and peak response acceleration. The reliability of the numerical model was estimated by its comparison with the experimental results acquired under the same impact conditions.

Keywords : Numerical Model(수치해석 모델), Multi-layered Panel(다층패널), Shock Behavior(충격거동), Shock Energy Absorption(충격에너지 흡수), Shock Response Spectrum(충격응답 스펙트럼), Peak Response Acceleration(최대응답 가속도)

1. 서 론

일반적으로 군용 차량 구조물은 강재(steel) 판이나 혹은 알루미늄(Al) 재질의 용접 구조로 제작되고 있으며, 재질의 특성상 외부로부터 인가된 하중을 그대로 내부에 전달하게 된다. 따라서, 차량 내부의 승무원 또는 전장품에 전달되는 충격 하중을 최소화 하기 위한

구조재 패널 개발^[1]이 요구되는 실정이다. 최근 이와 관련된 구조재 및 장갑판재에 대한 시험적 및 수치해석적 연구가 활발히 진행되고 있으며, Florence^[2,3]는 전체 에너지 균형(global energy balance)과 방탄한계속도와의 관계를 연구하였고, Woodward^[4]는 집중질량(lumped mass) 접근방법에 의한 관통 메커니즘에 대한 연구를 수행하였는데, 이 연구는 충돌후 시간별로 탄자의 잔류 질량과 속도관계의 연관성을 규명하였다. Chocron과 Galvez^[5]는 장갑판의 후판 재료로써 kevlar/epoxy와 같은 복합재료 모델을 제시하였는데, 이 모델에 의해서 충격탄의 잔류속도, 잔류질량과 후판재료의 처짐 및 변형률의 상관관계를 계산하였다. 이상의 연

† 2011년 9월 7일 접수~2011년 11월 4일 게재승인

* 현대로템 주식회사(Hyundai Rotem Company)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 박찬영(bulpai@hyundai-rotem.co.kr)

구들은 주로 세라믹이 장착된 장갑판재의 관통 메커니즘에 대한 수치 해석적 연구들이다.

본 연구에서는 충격 전달용 충격탄에 의해서 패넌에 인가된 충격 조건에 대해 패넌의 충격거동을 분석하기 위한 수치 해석적 연구를 수행하여, 동일 환경의 시험결과와 비교 분석을 수행 하였다. 또한 다양한 다층패넌에 대한 해석모델을 개발하여 동적 충격해석(dynamic impact analysis)을 수행 하였고, 동일 조건의 패넌 시험 시험결과를 SRS(Shock Response Spectrum)와 최대응답가속도(peak response acceleration) 결과를 비교 분석하여 단일 및 다층패넌에 대한 동적 충격거동의 경향성을 확인하였다.

2. 수치해석

충격탄과 단일 기준판, 다층판간의 충돌변형 거동을 구현하기 위해서 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Ls-dyna를 사용하였으며, 해석시간 단축을 위해서 1/4 모델의 면대칭 조건을 적용하였다.

가. 충격탄

충격탄의 수치해석 모델은 시험에 사용된 모델과 동일하며, 국방과학연구소에 의해 개발된 충격탄을 사용하였다. 충격탄^[6]의 크기 및 형상은 철갑탄(armor piercing)과 등가한 운동에너지를 단일 및 다층패넌에 적용하기 위한 것으로써, 재질은 Al100 소재를 사용하였다. 탄에 대한 동적 물성값은 시험적 획득이 어려워 적용하지 않았고, 시간에 따른 변형률(strain rate) 효과는 고려하지 않았다.

나. 단일 및 다층패넌

다층패넌의 사양은 방탄 성능 및 내충격 특성을 높이기 위해서 배열과 두께 비 최적화를 위한 Florence 최적배열 기법^[3]을 적용하여 구성되었다.

패넌은 피탄 충격시 각 층의 변형양상을 구현하기 위해서 솔리드 요소(solid element)를 사용하였으며, 솔리드 요소의 크기는 피탄시 패넌과 충격탄의 접촉침투(penetration) 발생을 고려하여 충격탄의 유한요소와 유사한 크기로 모델링을 하였다. 다층패넌인 경우 서로 다른 물성을 가지고 있는 패넌들로 구성되고 접합에 의해서 고정되어 있지만, 유한요소모델은 접촉면의 절점을 공유하지 않고 슬레이브 절점과 마스터 절점

간의 병진, 회전을 구속하는 구속 접촉(tied contact)을 적용하여 단순화 시켰다. 또한, 패넌들의 경계면은 층간침투 발생을 고려한 부가적인 면접촉 조건과 피탄 충격시 재료가 파손되어 소실되는 현상을 구현하기 위해서 파괴 접촉(eroding contact)을 적용하였다.

다층패넌들은 Al7039, 알루미늄 폼(Al-foam), 고무(NBR), FRP(S2-glass)의 조합으로 구성되며, 각 패넌들의 유한요소해석에 사용된 재료거동은 아래 식 (1)~(5)를 적용하였다. 알루미늄 폼의 경우 다층패넌에서 충격거동특성에 가장 큰 영향을 주는 재료이며, 탄성계수(elastic modulus)는 초기값이 외부 충격에 의한 상대 체적변화에 따라서 충분히 압축된 값으로 변형이 되고, 식 (1)에 의해서 선형적으로 변하게 된다.

$$\begin{aligned} E_{aa} &= E_{aau} + \beta(E - E_{aau}), \quad G_{ab} = E_{abu} + \beta(G - G_{abu}) \\ E_{bb} &= E_{bbu} + \beta(E - E_{bbu}), \quad G_{bc} = E_{bcu} + \beta(G - G_{bcu}) \\ E_{cc} &= E_{ccu} + \beta(E - E_{ccu}), \quad G_{ca} = E_{cau} + \beta(G - G_{cau}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서, a, b, c 는 각각 길이, 횡, 두께 방향을 나타내며, 상대 체적 변화는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \max[\min(\frac{1-V}{1-V_f}, 1), 0] \quad (2)$$

또, 충분히 압축된 전단 계수(shear modulus)는 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

고무는 Blatz와 Ko^[7]에 의해 제안된 비 압축성 고무 물성 모델을 사용하였다. 2차 Piola-Kirchhoff 응력은 식 (4)에 의해서 계산되어지며,

$$S_{ij} = G[\frac{1}{V}C_{ij} - V^{(\frac{1}{1-2\nu})}\delta_{ij}] \quad (4)$$

여기에서,

V : 상대 체적(초기 체적과 현재 체적의 비)

C_{ij} : Cauchy-Green strain tensor

ν : 포아송 비

응력은 Cauchy stress, σ_{ij} 으로 변환되며, 식 (5)의 관

계에 의해서 계산된다.

$$\sigma_{ij} = V^{-1} F_{ik} F_{jl} S_{ik} \quad (5)$$

여기에서, F_{ij} : the deformation gradient tensor

다. 재료의 기계적 물성

해석에 사용하기 위해서 구성 패널들의 정적 물성 시험을 수행하였고, 기계적 물성은 Table 1과 2에 나타내었다.

Table 1. 소재별 기계적 물성

재질 물성	단일패널 (기준패널)	다층패널		충격탄
	Al7039	Al-foam	rubber	Al1100
E (MPa)	71,706	1,920	241.3	68,948
ν	0.33	0.3	0.437	0.33
ρ (kg/m ³)	2,800	300	1,300	2,710
σ_y (MPa)	400	0.717	6.6	50
σ_{uts} (MPa)	432	1.039	-	95

Table 2. FRP 기계적 물성

물성	재질	S2-glass/페놀
elastic modulus	E_x, E_y, E_z (MPa)	29,860
shear modulus	G_{ab}, G_{bc}, G_{ca} (MPa)	2,990
poisson's ratio	ν	0.06
shear strength	S_{ba}, S_{ca}, S_{cb} (MPa)	38.1
compressive strength	C_x, C_y (MPa)	222
	C_z (MPa)	553.8
tensile strength	T_x, T_y, T_z (MPa)	602

라. 수치해석 모델링

Table 3은 본 연구에서 검토된 패널의 다층패널 및 두께를 나타내었으며, Table 4는 수치해석용 프로그램에서 해석모델에 사용된 각 단위 패널들의 물성 적용 모델을 나타낸 것이다.

해석 종료시간은 3~5ms로써 다층패널의 종류에

따라 두께 및 요소수가 다르고 충격탄에 의한 충격량 전달 시간이 차이가 있으므로 계산시간은 모델마다 다르며, 총에너지 변화율과 내부 에너지 변화율이 동일해지고 운동에너지가 0에 가까운 시간으로 정하였다.

Table 3. 수치해석모델 패널별 사양

종류	단일패널	다층패널 배열 및 모델 종류		
	모델 A	모델 B	모델 C	모델 D
항목	Al7039	Al/S2	Al/Al-foam/S2	Al/Al-foam/Rubber/S2
두께(t)	38.1	38.1	40.4	38.7

Table 4. 수치해석용 물성모델(Ls-dyna 물성모델)

종류	재질	Ls-dyna 물성모델
충격탄	Al1100	MAT003_plastic_kinematic
패널	Al7039	MAT003_plastic_kinematic
	Al-foam	MAT126_modified_honeycomb
	Rubber	MAT007_blatz_ko_rubber
	S2-glass	MAT059_solid_composite_failure

Fig. 1. 패널과 충격탄의 기하학적 형상 및 가속도 측정부위

Fig. 1은 단일 및 다층패널과 충격탄에 대한 기하학적 형상을 나타낸 것으로써, 해석모델의 구속부위와

모니터링 포인트는 시험 측정위치 및 경계조건을 동일하게 하기 위해서 충돌부 반대면의 모서리부로 부터 125mm 떨어진 4지점을 적용하였다. 가속도 샘플링 수는 시험 및 해석 모두 약 60kHz로 동일하게 적용하였다. Fig. 2 및 Fig. 3은 단일 및 다층패널과 충격탄의 유한요소모델을 나타낸 것으로써, 충격탄과 다층판 접합부의 부위별 접촉조건을 나타낸 것이다.

Fig. 2. 다층패널과 충격탄의 유한요소모델(1/4모델)

Fig. 3. 유한요소모델의 패널 접합부 접촉 조건

3. 결과 및 고찰

Table 5는 4가지 모델에 대한 시험과 해석결과의 최대응답가속도(g)를 비교한 것이다. 이것을 Fig. 4의 그래프로 나타내었으며, 단일패널에 비해서 다층패널의 최대응답가속도 완화 효과를 확인할 수 있었다. 특히 모델 C와 모델 D의 경우 수치해석 결과와 실험결과 모두 모델 A에 비해서 최대응답가속도가 약 1/10정도

수준으로 완화된 것을 확인할 수 있고, 패널별 최대응답가속도 크기 경향이 시험과 해석결과가 비교적 일치함을 확인 하였다. 또한 중량 관점에서도 모델 C와 모델 D가 우수하며, 특히 모델 D인 경우는 모델 A의 43.7% 수준으로 동일 충격량 대비 경량화 됨을 확인할 수 있다. Table 5에서 모델 B의 경우 오차율은 25.0% 로써, 비교적 크게 발생하였는데, 충격탄에 의한 패널 표적의 탄착점 위치편차가 시험과 해석결과 편차 원인인 것으로 판단된다. 모델 A, C, D인 경우에는 오차율이 2.0~10.0% 로써, 해석과 실험결과가 비교적 유사함을 확인할 수 있다.

Table 5. 모델 종류별 최대응답가속도 비교(시험 및 해석결과)

패널 종류	중량 (kg)	탄속도 (m/s ²)	시험결과 (g)	해석결과 (g)	오차율 (%)
모델 A	26.20	364.0	89,068	97,670	10.0
모델 B	20.18	466.0	44,237	33,117	25.0
모델 C	15.90	462.0	9,639	8,637	10.0
모델 D	14.74	474.3	8,356	8,212	2.0

Fig. 4. 모델 종류별 최대응답가속도 비교(시험 및 해석결과)

Fig. 5는 해석 결과에 대한 모델 종류별 최대응답가속도(g)를 그래프로 나타낸 것으로써 기준판인 모델 A에 비해서 다층패널인 모델 B, C, D의 최대응답가속도(g)가 상대적으로 매우 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 5. 모델 종류별 최대응답가속도 그래프(해석결과)

Fig. 6과 Fig. 7은 모델 종류별 해석 및 시험 결과에 대한 SRS(Shock Response Spectrum) 그래프를 나타낸 것이며, 모델별 해석 및 시험 결과의 주파수 범위별 가속도 수준 경향을 나타내고 있다. 결과 그래프로 부터 모델 종류별 가속도 수준 경향은 시험과 해석결과에서 비교적 유사한 경향성을 보이고 있다. 1kHz 주파수 범위 내에서는 모델 C가 모델 D에 비해 가속도 수준이 좀더 낮은 경향을 보이고 있지만, 10kHz 주파수 범위 내에서는 모델 C 및 모델 D의 가속도 수준은 거의 유사한 경향성을 보이며 충격완화 효과가 우수함을 확인 할 수 있다.

Fig. 6. 패널별 SRS 그래프(시험결과)

Fig. 7. 패널별 SRS 그래프(해석결과)

개발 요구조건인 기준판 대비 충격량 30% 감소 기준에서 모델 C와 D, 2가지 다층패널 모델은 개발 요구조건을 만족하고 있으나, 경량화 기준 적용시, 모델 D는 모델 C 대비 단위 패널당 7.03%의 중량감소 효과가 있음을 확인 할 수 있다. 다층패널이 실제 구조물에 적용할 경우 전체 구조물의 외부 면적크기를 고려해 볼 때 중량 감소 격차는 더욱 클 것으로 예상된다. 따라서, 모델 D가 동일한 충격 조건에서 주파수 범위별 가속도 수준은 모델 C에 비해서 다소 높거나 유사하지만, 최대응답가속도 및 경량화 기준에서는 알루미늄 기준 패널과 다른 다층패널에 비해서 우수함을 확인 할 수 있다.

Fig. 8~Fig. 11은 Table 3에서 언급한 4가지 유한요소 모델에 대해서 충격탄이 각 패널에 충돌하는 순간 동일시간(1.0ms)의 충격탄과 각 패널들의 변형양상 및 유효응력(effective stress) 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 8의 모델 A는 충격탄에 의해서 발생하는 응력 전파가 후판까지 전달되면서 댄핑 효과가 거의 없는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 9의 모델 B는 모델 A보다는 댄핑 효과가 있지만, 모델 C와 모델 D에 비해서 상대적으로 크지 않음을 확인 할 수 있었다. Fig. 10의 모델 C와 Fig. 11의 모델 D인 경우는 알루미늄 폼 및 고무의 압축변형에 의한 댄핑효과, 즉, 알루미늄 폼 및 고무의 과도 변형에 의해서 충격에너지가 흡수되고, 이에 따라서 알루미늄 폼 및 고무에 접합되어 있던 알루미늄 패널도 변형을 일으켜 충격 발생부 반대면인 후판에 충격량 전달이 매우 작음을 응력분포

를 통해서 확인 할 수 있다. 또한, Fig. 12 및 Table 6은 각 모델의 후판 센터부에서 충격탄 진행방향의 응력-시간 그래프와 최대 응력값을 나타낸 것으로써 응력분포와 충격완화성능이 유사한 경향성을 나타냄을 확인 할 수 있었다.

Fig. 8. 모델 A의 유효응력 분포(t=1.0ms)

Fig. 9. 모델 B의 유효응력 분포(t=1.0ms)

Fig. 10. 모델 C의 유효응력 분포(t=1.0ms)

Fig. 11. 모델 D의 유효응력 분포(t=1.0ms)

Fig. 12. 모델별 Z-stress 그래프

Table 6. 모델별 후면 센터부 최대 Z-stress 비교(해석 결과)

패널 종류	모델 A	모델 B	모델 C	모델 D
Z-stress (MPa)	86.8	24.6	1.2	1.1

Fig. 13. 모델 D 단면 변형형상(시험결과)

Fig. 13과 Fig. 14는 모델 D의 시험 및 해석결과의 충돌부 단면 형상을 비교한 것으로써, 충격탄 충돌후 변형 형상이 비교적 유사함을 확인 할 수 있다.

Fig. 14. 모델 D 단면 변형형상(해석결과)

4. 결 론

본 연구에서는 충격완화특성을 가진 다층구조 패널 개발을 위한 수치 해석적 접근 방법을 수행 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 세 가지의 다층패널에 대해서 충격거동 분석 방법인 최대응답가속도(g) 및 SRS에 의해서 시험과 해석결과의 비교 검증을 수행하였으며, 해석모델에 대한 신뢰할 수 있는 결과를 제시하였다.

둘째, 고속충돌시 다층패널 구성재료인 알루미늄 폼과 고무재질의 충격완화효과를 시험 및 해석결과 비교 분석을 통해서 확인하였다.

셋째, 고속충돌시 다층패널 배열의 재료 변형거동 예측에 있어서 시험과 해석결과 단면형상 및 그래프 비교를 통해서 신뢰성을 확보하였다.

본 연구를 통해 유사한 다층패널 및 구조재 모델에 대한 해석적 접근방법 활용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 소재물성에 대한 정확한 데이터 확보를 통해서 충격거동 해석모델 개선에 대한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] Tennyson RC and Lamontagne C, "Hypervelocity Impact Damage to Composites Part A, Vol. 31, 2000.
- [2] M. M. Shokrieh, "Penetration Analysis of a Projectile in Ceramic Composite Armor", SCI, January 2007.
- [3] Florence AL. Interaction of Projectiles and Composite Armor, Internal Report, US Army; August 1969.
- [4] Woodward RL, A Simple One-dimensional Approach to Modeling Ceramic Composite Armor Defeat, Int J Impact Eng 1990;9(4):455-74.
- [5] Chocron Benloulou IS, Sanchez-Galvez V. A New Analytical Model to Simulate Impact Onto Ceramic /Composite Armors, Int J Impact Eng 1998;21(6): 461-71
- [6] MIL-STD-1941, "Metal-Arc Welding of Homogeneous Armor", 1991.
- [7] Blatz PJ, Ko WL., Application of Finite Element Theory to the Deformation of Rubber Material, Trans Soc Rheol 1962;6:223-51.